

論文の内容の要旨

論文題目： 「推進剤供給式電熱型パルスプラズマスラスタの実験的研究 Experimental Study on Electrothermal Pulsed Plasma Thruster with Propellant Feeding System」

氏名： 吉川 哲史

近年、1-100 kg の超小型衛星の打上台数は増加の一途を辿っており、そこに搭載された観測・実験機器などの軌道上実証が盛んに行われている。ここで得られた知見が基盤となって、将来的に複数の超小型衛星による大規模なフォーメーションフライトミッションが予想される。この時、高度維持やフォーメーション展開のためのスラスタシステムが必須となる。このような背景から、本研究では想定されるミッションの要求を満足する「推進剤供給式電熱型パルスプラズマスラスタ」の提案と実験的検証を行った。パルスプラズマスラスタ (PPT) は小型・低電力の特徴をもつ電気推進である。無毒・固体推進剤のポリテトラフルオロエチレン (PTFE) を使用するため、高圧タンク等が不要で軽量かつ安全性が高く、ピギーバック打上げに優位である。PPT には、放電によって昇華した気体を空力的に加速する電熱型と、ローレンツ力によって加速する電磁型の2種が存在する。このうち前者の電熱型 PPT は、電磁型 PPT と比べ推力電力比が大きく、低電力で比較的大きな推力を得られることから、50 kg 級の超小型衛星への応用が期待される。しかし、電熱型 PPT は固体推進剤を放電室 (キャビティ) として用いるため、連続作動に伴いキャビティ容積が増大し推力 (インパルスビット) の低下を招く。また、キャビティ容積の拡大に伴ない「チャーリング」という炭素汚染がキャビティ壁面に発生する。これらはインパルスビット不発 (ミスショット)・異常放電による制御不能を引き起こす。結果、電熱型 PPT のトータルインパルスを制限する要因となる。このため、トータルインパルスの底上げを図る目的で高エネルギー化・クラスタ化による対策が多くなされてきた。一方で本研究で提案した「推進剤供給方式」は、電熱型 PPT のキャビティ内部で消費した推進剤を外部から補給することでキャビティ容積を維持することがコンセプトとなる。これは、スラスタ単機のインパルスビットが維持され、かつ作動回数が増大することによるトータルインパルスの向上が期待できる。しかしながら、電熱型 PPT への推進剤供給方式の適用は、異常放電モードや供給不可といった課題のため未だ確立されていない。本研究は、50 kg 級の超小型衛星による想定ミッションのスラスタシステムへの要求を定め、PTFE ロッドを供給する推進剤供給式電熱型 PPT (PTFE ロッド供給式電熱型 PPT ; ロッド供給式 PPT) を開発した。そして、インパルスビット・推進剤消費量・平均推力を計測可能な独自のスラストスタンドと組み合わせ、そのスラスタシステムの成立性の実験的検証を行った。本論文は7章から成り、構成は以下となっている。

第1章では、研究背景として超小型衛星に搭載するスラストシステムとしての電熱型 PPT の必要性や先行研究を説明し、本研究の位置づけと研究目的を明らかとした上で、論文構成をまとめている。

第2章では、まず電熱型 PPT を搭載した 50 kg 級の超小型衛星によるフォーメーションフライトを想定ミッションとして掲げ、このミッションのスラストシステムへの性能要求を明示している。この上で、電熱型 PPT の原理・特徴を説明し、想定ミッションの遂行に向けた課題について述べている。

第3章では、本研究で使用した真空装置等の地上実験設備や、PPT の主放電やイグニッションに必要な電源系、およびスラストスタンド系の仕様や構成を図表と共にまとめている。

第4章では、スラストスタンド系に焦点を当て、電熱型 PPT のインパルスビットとマスロス、および平均推力を同時に測定可能な「シーソー型スラストスタンド」とそのキャリブレーション装置について述べている。このスラストスタンドは、マスロスが測定可能であることから、従来必要であった大気開放が不要となり、大気暴露による固体推進剤へのコンタミネーションがもたらす性能への影響を除去できる。また、構造が複雑化しやすい推進剤供給式電熱型 PPT のスラスト分解も不要となることから、性能取得の高効率化を期待できる。シーソー型スラストスタンドと共に開発したキャリブレーション装置は、装置そのもののキャリブレーションが不要であり、シンプルで直接的なキャリブレーションを高精度に行える。この章では、これらのキャリブレーション装置を用い、電熱型 PPT の性能測定を実施して測定精度の評価を行った。

第5章では、PTFE ロッドを供給する推進剤とし、その供給性とキャビティ内の気密性の確保を両立しつつ、異常放電や供給不能といった故障モードを回避できる「ロッド供給式 PPT」の設計・製作を行った。前章のシーソー型スラストスタンドを利用して、手動での推進剤供給を行いながら製作した PPT の性能取得を実施した。ここでの測定結果から、ロッド供給式 PPT のインパルスビット維持の可否を、類似する放電室寸法形状をもつ通常の電熱型 PPT のインパルスビットと比較することで確認した。そして、チャーリングが起因する異常放電などの故障モード回避の条件や、性能決定要因、現状の問題点を考察し、さらなるトータルインパルス向上への指針を示した。

第6章では、ロッド供給式 PPT のフライトモデル化を見据えたスラストシステム開発の一環として、推進剤供給装置を製作し遠隔操作による PTFE ロッド供給の可否の確認を行った。開発した装置をロッド供給式 PPT に装着し、装置による推進剤供給を行いながら作動試験を行い、スラストシステム構築へ向けた作動実証を行った。またこの試験を通じて、シーソー型スラストスタンドによって大気開放とスラスト分解のプロセスを省略した性能取得が可能であることも実証した。

最後に第7章では、本研究の成果をまとめ、推進剤供給式電熱型 PPT のスラストシステムとしての成立性の実験的検証に成功したと結論づけた。